



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODEL ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU

MODEL ROBOTIC TABLE SOCCER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alexander Korotynskiy

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Alexander Korotynskiy

ID: 186530

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/2019

NÁZEV TÉMATU:

Model robotického stolního fotbalu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte rešerši týkající se robotického stolního fotbalu a algoritmy pro zpracování scény.
- 2) Seznamte se systémem Automation Studio V4 a vizualizací scény.
- 3) Seznamte se s mikropočítačem Raspberry Pi a kamerou Raspberry Pi pro detekci polohy míčku.
- 4) Navrhněte komunikační protokol Raspberry Pi - PLC a algoritmus pro vyhodnocení polohy míčku kamerou Raspberry Pi.
- 5) Ověřte funkčnost protokolu a algoritmu pro zpracování scény na reálném modelu robotického stolního fotbalu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Firemní literatura B&R: Automation Studio V4

[2] Firemní literatura B&R: Produkty pro řízení pohybu a vizualizace společnosti B&R

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

Konzultant: Ing. Roman Mužík, B+R Brno

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je vyhodnocení polohy míčku kamerou Raspberry Pi na hrací ploše robotického stolního fotbalu společnosti B&R a návrh komunikačního protokolu mezi Raspberry Pi a PC. První část práce je věnována existujícím řešením robotického stolního fotbalu a seznámením se s používaným hardwarem. Druhá, praktická část, je věnována návrhu správného algoritmu pro vyhodnocení polohy míčku na hrací ploše robotického stolního fotbalu. Také je věnována návrhu komunikačního protokolu Raspberry Pi – PC pro model robotického stolního fotbalu.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to evaluate the position of the ball by Raspberry Pi camera on the playing area of B&R's robotic table football and design of a communication protocol between a Raspberry Pi and a PC. The first part of the thesis is devoted to the existing solutions of robotic table footballs and a familiarization to the used hardware. The second, practical part, is devoted to the design of the correct algorithm for evaluating the position of the ball on the playing area of robotic table football. It is also devoted to the design of communication protocol Raspberry Pi – PC for a robotic table football model.

Klíčová slova

Stolní fotbal, robotický stolní fotbal, kamera, FPS, OpenCV, Raspberry Pi, PC, UDP, TCP

Key words

Table football, robotic table football, camera, FPS, OpenCV, Raspberry Pi, PC, UDP, TCP

Bibliografická citace:

KOROTYNSKIY, Alexander. *Model robotického stolního fotbalu*. Brno, 2019.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118405>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Pivoňka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model robotického stolního fotbalu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **14. května 2019**

.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Petrovi Pivoňkovi, CSc. za jeho pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce. Taky chci poděkovat firmě B+R automatizace s.r.o., která poskytla prostředky a rady pro tuto bakalářskou práci.

V Brně dne: 14.05.2019

.....

Podpis autoru

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1. ÚVOD	12
2. STOLNÍ FOTBAL	13
3. EXISTUJÍCÍ ŘEŠENÍ ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU	14
3.1 Řešení na katedře řídicí techniky ČVUT	14
3.2 Řešení ve švýcarském federálním technologickém institutu v Lausanne	15
3.3 Technical University of Denmark	16
3.4 University of Freiburg	16
3.5 PILZ	17
4. POUŽITÝ HARDWARE A SCÉNA	18
4.1 Hrací plocha	18
4.2 Osvětlení	19
4.3 Panel PC 2100	21
4.3.1 Automation Studio	21
4.4 Použitý hardware	22
4.4.1 Raspberry Pi	22
4.4.2 Kamera	23
5. KOMUNIKACE RASPBERRY PI – PC	25
5.1 Protokol Powerlink	25
5.2 Protokol TCP	26
5.3 Protokol UDP	26
6. KNIHOVNA OPENCV	27
6.1 Barevné prostory	27
6.1.1 Barevný prostor RGB	27
6.1.2 Barevný prostor HSV	28
7. POSTUP ŘEŠENÍ	29
7.1 Umístění kamery	29
7.2 Jedna V2 kamera	30
7.3 Dvě V2 kamery s fish-eye objektivy	34
7.4 Dvě V1 kamery	36
8. POPIS ALGORITMU PRO VYHODNOCENÍ POLOHY MÍČKU	40
9. POPIS KOMUNIKAČNÍHO ALGORITMU	43

10. ZÁVĚR	45
Literatura.....	47
Seznam příloh	51

Seznam symbolů a zkratek

A – ampér

BSD – Berkeley Software Distribution

cm – centimetr

CN – Controlled Node

CPU – Central Processing Unit

CSI – Camera Serial Interface

ČVUT – České vysoké učení technické v Praze

FPS – frames per second

g – gram

GB – Gigabyte

HDMI – High Definition Multimedia Interface

HSV – Hue Saturation Value

IP – Internet Protocol

kg – kilogram

mA – miliampér

MLC – Multi-level Cell

mm – milimetr

MN – Managing Node

ms – milisekunda

OpenCV – Open Source Computer Vision

px – pixel

RGB – Red Green Blue

SSH – Secure Shell

TCP – Transmission Control Protocol

UDP – User Datagram Protocol

USB – Universal Serial Bus

V – volt

W – watt

μs – mikrosekunda

Seznam obrázků

Obr. 1: Ukázka stolního fotbalu [1]	13
Obr. 2: Robotický stolní fotbal vyvinutý na ČVUT [3].....	14
Obr. 3: Robotický stolní fotbal vyvinutý na EPFL [4]	15
Obr. 4: Pohled na robotický stolní fotbal (Technická univerzita v Dánsku) [6]	16
Obr. 5: Robotický stolní fotbal vyvíjený na technické univerzitě ve Freiburgu [7]	17
Obr. 6: Pohled na robotický stolní fotbal vyvíjený firmou PILZ [8].....	17
Obr. 7: Ukázka povrchu hrací plochy	19
Obr. 8: Výkonné pružné světlo LL-245W [10]	19
Obr. 9: Konstrukce pro osvětlení hrací plochy	20
Obr. 10: Výkonnostní panel PC 2100 multi-touch [12].....	21
Obr. 11: Náhled na uživatelské rozhraní Automation Studio V4 [14].....	22
Obr. 12: Raspberry Pi 3 model B [15]	23
Obr. 13: Kamerový modul V2 Raspberry Pi [18].....	24
Obr. 14: Ukázka POWERLINK cyklu [19].....	25
Obr. 15: Grafické zobrazení RGB [25].....	28
Obr. 16: Grafické zobrazení HSV [26]	28
Obr. 17: Zákryt míčku hráčem [27]	30
Obr. 18: Zapojení kamerového modulu V2 do Raspberry Pi 3 B.....	32
Obr. 19: Pohled na hrací plochu z kamery V2.....	33
Obr. 20: Výsledek hledání žlutého míčku kamerou V2 v barevném prostoru HSV	33
Obr. 21: Ořezávání obrazu kamerou V2 v režimu nad 40 FPS	34
Obr. 22: Pohled na hrací plochu z první kamery V2 s objektivem.....	35
Obr. 23: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V2 s objektivem	35
Obr. 24: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V2 s objektivem po ořezávání	36
Obr. 25: Výsledek hledání žlutého míčku v barevném prostoru HSV	36
Obr. 26: Pohled na hrací plochu z první kamery V1	37
Obr. 27: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V1.....	37
Obr. 28: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V1 po ořezávání	38
Obr. 29: Výsledek hledání žlutého míčku kamerou V1 v barevném prostoru HSV	38
Obr. 30: Schéma zapojení pro přenos dat	39

Seznam tabulek

Tab. 1 Specifikace hracího stolu [9]	18
Tab. 2 Parametry pruhového světla [11]	20
Tab. 3 Výsledky výpočtu pro různé objektivy	31

1. ÚVOD

V současnosti dochází k velkému rozvoji v oblasti automatizace. Stolní fotbal není výjimkou. Lidé si myslí, že stolní fotbal je jenom zábava, ale může to taky být profesionální sport a cílem automatizace stolního fotbalu je udělat ho tak, aby mohl porazit člověka. V budoucnu je možné udělat soutěž ve stolním fotbalu mezi roboty, kde bude možnost naprogramovat nějakou strategii a pak se podívat, která strategie vyhraje.

Hlavním cílem bakalářské práce je vylepšení stávajícího řešení robotického stolního fotbalu, který vznikl pod vedením společnosti B&R Automation v roce 2016. Celý projekt slouží především pro reklamní účely a propagaci společnosti B&R Automation a také Vysokého učení technického v Brně.

Bakalářská práce se zabývá především detekcí míčku na hrací ploše stolního fotbalu. V úvodu práce jsou popsány různé způsoby řešení robotického stolního fotbalu ve světě. Práce se také zabývá vhodným výběrem řešení pro tento cíl, vytvořením softwaru a dalším zpracováním údajů. Na základě zjištěné polohy a rychlosti míčku pomocí kamery budou reagovat motory. Data z kamery se posílají do Raspberry Pi, kde se zpracují a výsledek se pošle do PC, který řídí motory pro pohyb hráčů na stolním fotbalu. Bakalářská práce se také zabývá realizací komunikačního protokolu pro přenos dat z Raspberry Pi do PC. V poslední řadě bude testováno vyhledávání míčku na hrací ploše reálného modelu robotického stolního fotbalu.

Zadaná bakalářská práce se navazuje na bakalářskou práci Bc. Lubomíra Bubeníka, který řešil vyhodnocení polohy míčku pomocí inteligentní kamery Cognex IS 7402. [32] Kamera Cognex IS 7402 komunikuje s PC pomocí protokolu Powerlink. Ve výsledku jeho práce vyhledávání míčku na celé ploše fotbalu trvalo přibližně 81 ms, respektive přibližně 13 FPS, což není postačující na rychlé reagování motoru robotického stolního fotbalu.

Proto byl vybrán jiný přístup, z jinými komponenty technického vybavení, zejména mikropočítač Raspberry Pi a kamera Raspberry Pi.

2. STOLNÍ FOTBAL



Obr. 1: Ukázka stolního fotbalu [1]

Stolní fotbal ve světě je znám jako table soccer anebo foosball. Komplexní stolní fotbal byl vyvíjen a patentován ve Velké Británii ještě v roce 1922 Haroldem Searlsem. V roce 2002 ve Francii byla založená mezinárodní federace stolního fotbalu, což znamená, že od roku 2002 stolní fotbal se stal profesionálním sportem.

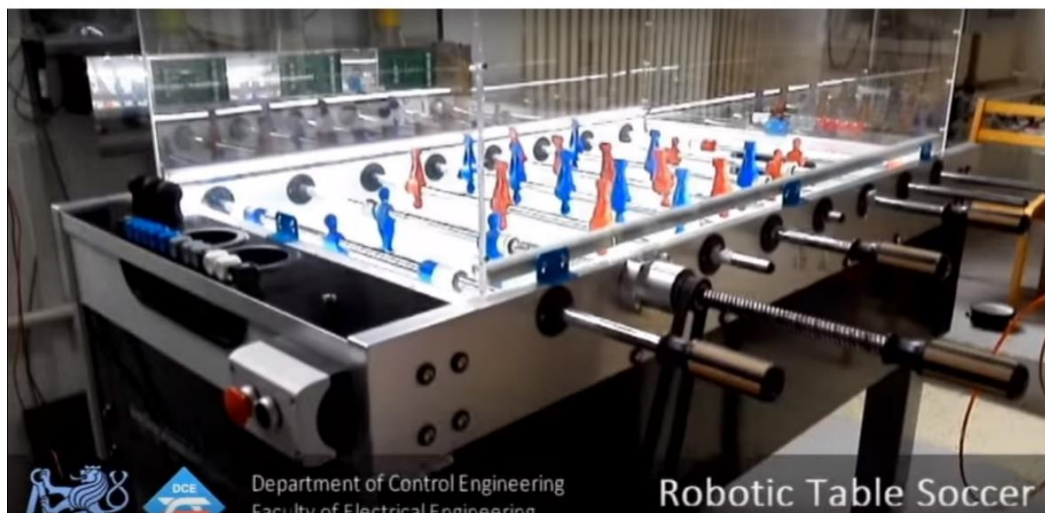
Stolní fotbal je většinou hra pro 4 hráče – 2 útočníky a 2 obránce. Základem stolního fotbalu je krabice ve tvaru hrací plochy se dvěma brankami na obou stranách. Stolní fotbal má 8 tyčí, 4 tyče má jeden tým a další 4 tyče má tým druhý. Cílem hry je dát protihráčům co nejvíc gólů do branky. Hráči otáčejí rukojetí tyčí, které leží po šířce stolu, na nichž jsou připevnění „fotbalisté“ ve správné výšce, aby kopli do míče – pokud je načasování správné. Na jedné tyči je umístěn brankář, na druhé tyči jsou umístěni dva obránce, na třetí je umístěno pět záložníků a na poslední tyči jsou umístěni 3 útočníci. Pro zahájení hry je míč podáván přes otvor ve stolu nebo se položí rukou na plochu ve středu stolu. Obvykle má stolní fotbal hrací plochu v rozměrech 140x75 cm. [2]

3. EXISTUJICÍ ŘEŠENÍ ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU

Skoro všechna řešení robotického stolního fotbalu jsou určena pro vědecké účely. Předěláním stolního fotbalu na automatizovaný stolní fotbal z jedné strany pro hru s člověkem se zabývá několik univerzit v České republice a zahraničí.

3.1 Řešení na katedře řídicí techniky ČVUT

Student Elektrotechnické fakulty v Praze Bc. Vojtech Myslivec v roce 2014/2015 napsal diplomovou práci na téma “Robotický stolní fotbal”. Cílem jeho práce bylo navrhnout řízení jedné fotbalové osy, napsat algoritmy pro detekci polohy míčku a jednotlivých fotbalistů.



Obr. 2: Robotický stolní fotbal vyvinutý na ČVUT [3]

V této práci se podařilo nakonfigurovat řídicí systém a jednotlivé motory pro plynulý chod systému. K řízení pohybu hráčů byly použity motory 1FK7 SIMOTICS od firmy Siemens. Hráče na ose je možné přesunout do libovolné pozice za dobu kratší než 500 ms. Osvícení hrací plochy je uděláno pomocí 5 LED pásků, čtyři po stranách hřiště a jeden nad hřištěm. K systému je připojena inteligentní kamera pro detekci polohy míčku a umístění hráčů Cognex In-Sight 7402, která komunikuje pomocí sítě

PROFINET. Kamera je umístěna nad hrací plochou, je přesná na 2 mm a čas za který kamera detekuje polohu míčku je 25,5 ms. [3]

3.2 Řešení ve švýcarském federálním technologickém institutu v Lausanne

Robotický stolní fotbal vyvíjený na švýcarské univerzitě Ecole polytechnique fédérale de Lausanne dokáže porazit lidi, kteří nemají zkušenost se stolním fotbalem. Systém je schopen detekovat míč, zastavit ho a potom vystřelit do brány.



Obr. 3: Robotický stolní fotbal vyvinutý na EPFL [4]

Pro detekování polohy míčku použili kameru, umístěnou pod průhlednou hrací plochou, která dokáže zachytit 300 snímků za jednu sekundu a posílají obrazy do počítače pro další zpracování. Pomocí algoritmu pro zpracování obrazu sledují pohyb míče v reálném čase. Oproti kameře umístěné nad hrací plochou je výhoda v tom, že míček je vždy viditelný a nemůže se dostat do zákrytu hráči. Pro posun osy s hráči mají jeden lineární motor a pak rotační motor otáčí hráči pro střelení míče. Motory jsou přesné na méně než jeden milimetr a mohou mít zrychlení až 9 g, což je rychlejší než reakce člověka. Pro vylepšení svého robotického stolního fotbalu chtějí sledovat polohu hráče lidského protivníku a udělat lepší strategii hry. [4][5]

3.3 Technical University of Denmark

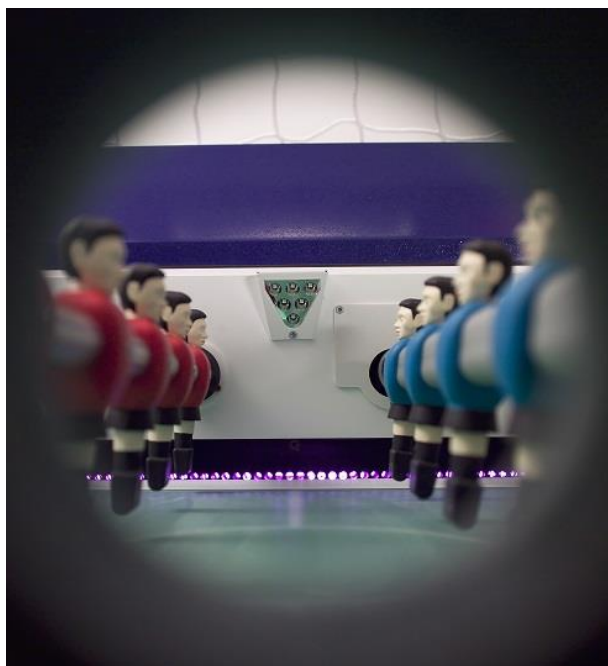
Robotický stolní fotbal na technické univerzitě v Dánsku byl dokončen v roce 2007. Projekt byl funkční a robot byl schopný porazit člověka. Pro sledování polohy míčku použili černobílou kameru s frekvencí 25 snímků za sekundu, kterou umístili nad hrací plochou. Snímky z kamery se posílaly do počítače, kde se vyhodnocovala pozice míčku. Pohyb hráčů se prováděl dvěma rotačními motory. [6]



Obr. 4: Pohled na robotický stolní fotbal (Technická univerzita v Dánsku) [6]

3.4 University of Freiburg

Výzkumný projekt univerzity ve Freiburgu v Německu pro robotický stolní fotbal je navržen tak, aby inteligentně reagoval na situační stavy, které se ve hře provádějí. Pro pohyb os se používají vysokorychlostní stejnosměrné motory. Pro detekci polohy míčku se používá infračervená kamera, která je umístěna pod hrací průhlednou plochou. Snímky z kamery jsou vyhodnocovány s periodou 20 ms. Tím určí pozici míčku a jeho rychlost. Hrací plochu osvětluje přibližně 300 diod, vydávající infračervené světlo. Samotný hrací povrch je pokryt infračerveným propustným filtrem pro usnadnění sledování polohy míčku. [7]



Obr. 5: Robotický stolní fotbal vyvíjený na technické univerzitě ve Freiburgu [7]

3.5 PILZ

V roce 2016 PILZ prezentovala na mezinárodním veletrhu Amper robotický stolní fotbal. Pro sledování polohy míčku mají umístěnou kameru pod hrací matovou průhlednou plochou. Osy se otáčejí pomocí rotačních motorů. Pohyb os vykonávají také rotační motory, které pomocí šroubovice mění rotační pohyb na lineární. [9]



Obr. 6: Pohled na robotický stolní fotbal vyvíjený firmou PILZ [8]

4. POUŽITÝ HARDWARE A SCÉNA

V této části budou popsány komponenty technického vybavení, které se používají v této bakalářské práci. Bude popsán samostatný stolní fotbal, osvětlení hrací plochy, výběr technického vybavení a jeho vlastní komponenty. Zejména kameru a Raspberry Pi.

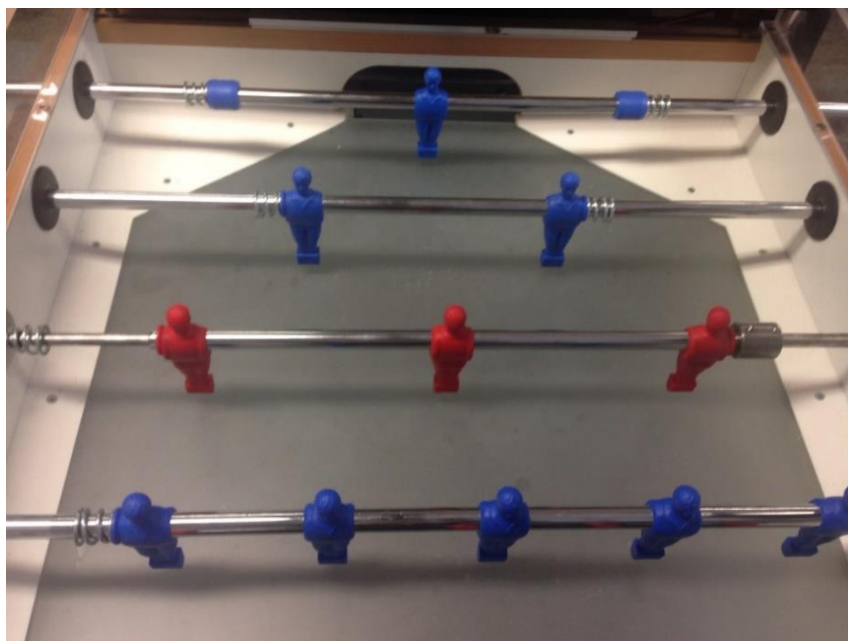
4.1 Hrací plocha

Základním prvkem celé soustavy je stolní fotbal od firmy Garlando model G-500 EVOLUTION. Rozměry stolu odpovídají standardu ITSF World Championship. Parametry stolu jsou:

Model	G-500 Evolution
Délka	143cm
Šířka	76cm
Výška	88/91cm
Hmotnost	75kg

Tab. 1 Specifikace hracího stolu [9]

Povrch hrací plochy je realizován ze skla s matnou úpravou. Kvůli tomu je možnost umístit kameru pod hrací plochu a snímat polohu míčku a hráčů. Sklo má matný povrch kvůli tomu, že kamera lépe detekuje předměty, které se nacházejí přímo na ploše, což je dobré pro detekci polohy míčku. S rostoucí vzdáleností se obraz rozmazává. Člověk nevidí žádné předměty, které se za matným sklem nacházejí.



Obr. 7: Ukázka povrchu hrací plochy

4.2 Osvětlení

Na začátku této práce měl už robotický stolní fotbal konstrukci pro osvětlení a výkonné pruhové světlo modelu LL-245W. Jak se pak ukázalo osvětlení je vyhovující pro sledování polohy míčku.

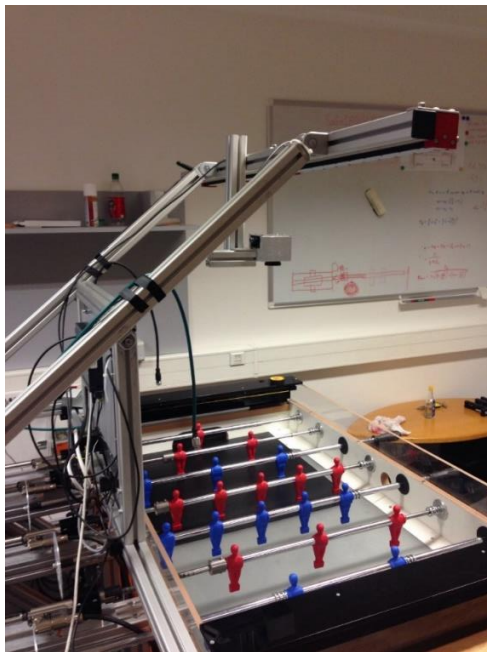


Obr. 8: Výkonné pruhové světlo LL-245W [10]

Model	LL-245-W
Délka	285 mm
Šířka	46 mm
Výška	50 mm
Hmotnost	814 g
Aktivní plocha	245 mm
Vlnová délka	bílá
Úhel vyzařování	120°
Rozsah napětí	20-28 V
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovitý proud	460 mA
Maximální proud	625 mA
Trigrovací napětí	3-28 V
Trigrovací proud	2,3 mA
Příkon	11 W

Tab. 2 Parametry pruhového světla [11]

Hrací plochu osvětlují 3 výkonná pruhová světla LL-245W, upevněná na konstrukci, kterou je vidět na obrázku 9. Problém je v tom, že celá hrací plocha není homogenně osvětlená. Na okrajích hrací plochy je intenzita světla menší než ve středu plochy. Kvůli tomu byly nad brankami stolního fotbalu přidány LED pásy pro zvýšení intenzity světla na těchto místech.



Obr. 9: Konstrukce pro osvětlení hrací plochy

4.3 Panel PC 2100

Hlavní řídicí jednotkou stolního fotbalu je Panel PC 2100 multi-touch. Panel PC 2100 je extrémně výkonným PC systémem, který integruje všechna důležitá rozhraní, včetně 2x gigabitového Ethernetu, 1x USB 2.0 a 1x USB 3.0. Má v sobě moduly rozhraní jako jsou POWERLINK a CAN. Pro ukládání dat jsou k dispozici karty CFast založené na MLC, které mohou uložit více než 60 GB dat. Panel PC 2100 zobrazuje od 15,6 "HD do 24" Full HD [12]



Obr. 10: Výkonnostní panel PC 2100 multi-touch [12]

4.3.1 Automation Studio

Automation Studio je integrované vývojářské prostředí, které vytvořila firma B&R a stále ho vyvíjí. Automation Studio slouží ke zjednodušení řešení automatizačních úloh. Má v sobě nástroje pro hardwarovou a softwarovou konfiguraci, programování, vizualizaci, bezpečnostní technologii, řízení a regulaci pohonů. Automation Studio má prvky, kde není potřeba psát kód, ale jenom vyplnit připravenou tabulku a software vygeneruje kód automaticky. Kvůli tomu se v Automation Studiu snáze programují některé úkoly. Výhodou Automation Studia je možnost programovat v několika jazycích, grafických nebo textových. Mezi ně patří jazyky normy IEC 61131-3:

- 1) Ladder diagram (LD) – grafický jazyk
- 2) Function block diagram (FBD) – grafický jazyk
- 3) Structured text (ST) – textový jazyk
- 4) Instruction list (IL) – textový jazyk

5) Sequential function chart (SFC) – grafický a textový jazyk

V Automation Studiu je také možnost programovat v jazycích CFC (Continuous Function Chart), ANSI-C a C++.

Dalším specifikem programování v Automation Studiu je rozdělení programu do taskových (cyklických) tříd, jejichž může být maximálně 8. Taskové třídy s kratším časem periody mají prioritu nad pomalejšími. [14]



Obr. 11: Náhled na uživatelské rozhraní Automation Studia V4 [14]

4.4 Použitý hardware

4.4.1 Raspberry Pi

Pro zpracování obrazu se v této práci používá jednodeskový počítač Raspberry Pi. Na začátku této práce ve školním roce 2017/2018 se jako poslední model prodávalo Raspberry Pi 3 model B, který byl uveden do prodeje v roce 2016. Bylo rozhodnuto používat ten model kvůli nejlepší charakteristice ve srovnání s ostatními modely.



Obr. 12: Raspberry Pi 3 model B [15]

Raspberry Pi 3 model B používá Broadcom BCM2837, který obsahuje čtyřjádrový procesor ARM Cortex-A53 taktovaný na 1,2 GHz. Má v sobě 1 GB operační paměti. Na rozdíl od ostatních modelu Raspberry Pi 3 má Wi-Fi a Bluetooth moduly. Obsahuje konektor pro monitor (HDMI), CSI port pro zapojení kamery, čtyři porty USB 2.0, port Micro SD pro načítání operačního systému a ukládání dat. Raspberry Pi se napájí pomocí microUSB vstupu, maximální proud je 2,5 A. Připojit Raspberry Pi 3 model B k internetu lze pomocí Wi-Fi nebo pomocí Ethernet kabelu. [15] [16]

4.4.2 Kamera

Pro sledování polohy míčku na stolním fotbalu je pro kameru nejdůležitější parametr snímací frekvence. Snímací frekvence kamery znamená počet snímků, který udělá kamera za 1 sekundu. Čím víc je snímací frekvence kamery, tím rychleji lze určovat polohu míčku na ploše stolního fotbalu. Další důležitý parametr pro kameru je rozlišení. Rozlišení kamery je počet pixelů, které může mít obraz. Při velkém rozlišení je jednodušší najít přesněji míček na ploše kvůli tomu, že na celou plochu míčku bude větší počet pixelů.

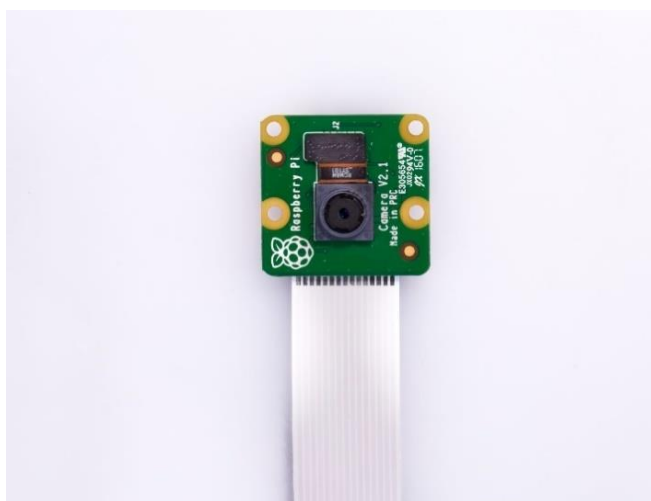
Pro detekci polohy míčku lze použít kamerový modul V1 (Camera Module V1) nebo kamerový modul V2 (Camera Module V2) od Raspberry Pi.

Camera Module V1

Camera Module V1 je oficiální produkt od Raspberry Pi a byl uveden do prodeje v roce 2013. Kamerový modul V1 má v sobě pět megapixelový snímač OmniVision OV5647. Připojuje se pomocí 15 cm flexibilního kabelu do CSI konektoru na Raspberry Pi umístěného mezi audio-video výstupem a HDMI portem. Může pracovat se všemi modely Raspberry Pi 1, 2 a 3. Rozměr kamerového modulu je 25x24x9 mm. Maximální snímací frekvence kamery je 90 snímků za sekundu při rozlišení 640x480 px. Maximální rozlišení kamery je 2592 x 1944 px. Dodávaný objektiv s kamerou má ohniskovou vzdálenost 3,6 mm a kamera má s tímto objektivem úhel záběru 53,5°x41,4°. [17]

Camera Module V2

Camera Module V2 je nejnovější kamera, která se prodává k Raspberry Pi. Byla uvedena do prodeje v roce 2016. Kamerový modul V2 má v sobě osm megapixelový snímač Sony IMX219. Stejně tak jako kamerový modul V1 připojuje se pomocí 15 cm flexibilního kabelu do CSI konektoru na Raspberry Pi umístěného mezi audio-video výstupem a HDMI portem. Může pracovat se všemi modely Raspberry Pi 1, 2 a 3. Rozměr kamerového modulu je stejný jako u modulu V1. Maximální snímací frekvence kamery je 90 snímků za sekundu při rozlišení 640x480 px. Maximální rozlišení kamery je 3280 x 2464 px. Dodávaný objektiv s kamerou má ohniskovou vzdálenost 3,04 mm a kamera má s tímto objektivem úhel záběru 62,2°x48,8°. [17]

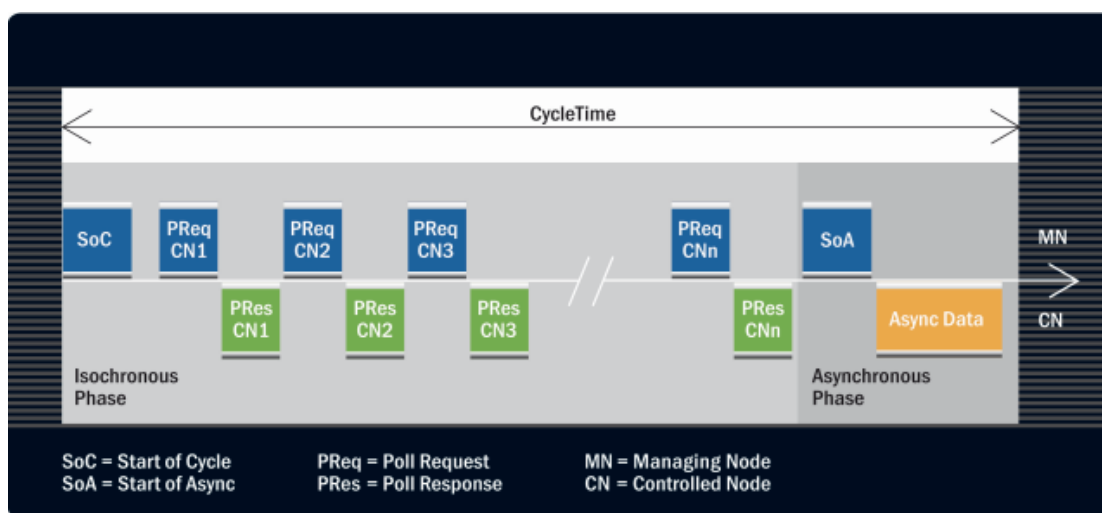


Obr. 13: Kamerový modul V2 Raspberry Pi [18]

5. KOMUNIKACE RASPBERRY PI – PC

5.1 Protokol Powerlink

Protokol Powerlink, vyvinutý společností B&R v roce 2001, je časově rychlá komunikace, která se využívá pro přenos dat v reálném čase. Jeden uzel je určen k tomu, aby fungoval jako Managing Node (MN). Všechna ostatní zařízení fungují jako Controlled Nodes (CN) – kterých může být až 240. MN definuje časový impuls pro synchronizaci všech zařízení a řídí datový komunikační cyklus. V průběhu jednoho cyklu MN postupně volá každý CN. Nejkratší nastavitelná perioda cyklu je 200 μ s. Maximální rychlost přenosu je 1 GB/s. Ale ne všechny zařízení podporují takové parametry. Cyklus Powerlinku se skládá ze třech period. Každý cyklus se v Powerlinku začíná startovací periodou, která se nazývá „Start of Cyclic Frame“, který vysílá MN. Na základě toho signálu všechny připojené CN nastaví hodiny reálného času. V další periodě, která se nazývá izochronní fáze, MN vysílá zprávy PollRequest, které přenášejí data z MN do dotazované CN. Každý CN potom pošle své vlastní údaje do všech ostatních uzlů prostřednictvím zprávy PollResponse. Třetí perioda cyklu znamená začátek asynchronní fáze, která umožňuje přenos datových paketů, které nejsou časově kritické, např. parametrizační data. [19]



Obr. 14: Ukázka POWERLINK cyklu [19]

5.2 Protokol TCP

Protokol TCP (z anglického Transmission Control Protocol) je protokol transportní vrstvy v sadě protokolu TCP/IP. TCP je definován v dokumentu RFC 793. Zařízení, která jsou mezi sebou ve spojení, mohou obousměrně přenášet data pomocí protokolu TCP. Protokol TCP se používá pro spolehlivé doručování a pro doručování dat ve správném pořadí. Identifikuje aplikace na počítačích pomocí takzvaného portu. Na jednom počítači nemohou dvě aplikace používat stejný TCP port. Spolehlivost protokolu TCP spočívá v systému číslování paketu dat a potvrzování jejich přijetí druhou stranou spojení. V případě nepotvrzení data se posílají znovu. Pokud data byly doručeny v nesprávném pořadí, tak TCP protokol data správně sestaví. TCP protokol taky spočítá kontrolní součet odesílaných dat a uloží číslo do odesílaného paketu. Po přijetí všech dat znovu se provede kontrolní součet a čísla se musí shodovat. [20]

5.3 Protokol UDP

Protokol UDP (z anglického User Datagram Protocol) je protokol transportní vrstvy. Používá IP jako síťový protokol. UDP je definován v dokumentu RFC 768. UDP slouží ke komunikaci dvou zařízení. Stejně jako u protokolu TCP identifikuje aplikace na počítačích pomocí takzvaného portu. Při použití protokolu UDP není potvrzováno doručení dat z jednoho zařízení do druhého a není zaručeno pořadí doručení dat. Což ale zrychluje komunikaci mezi dvěma zařízeními, ale přenos dat se stává nebezpečným (data se mohou ztratit, poškodit, duplikovat). Pro spolehlivé doručení dat se musí používat protokol TCP. UDP se využívá při časově kritických přenosech dat, u kterých tolik nezáleží 100 % úspěšnosti přenosu. Přenáší se velký objem dat a jejich potvrzování pro síť je náročné. [21] [22] [23]

6. KNIHOVNA OPENCV

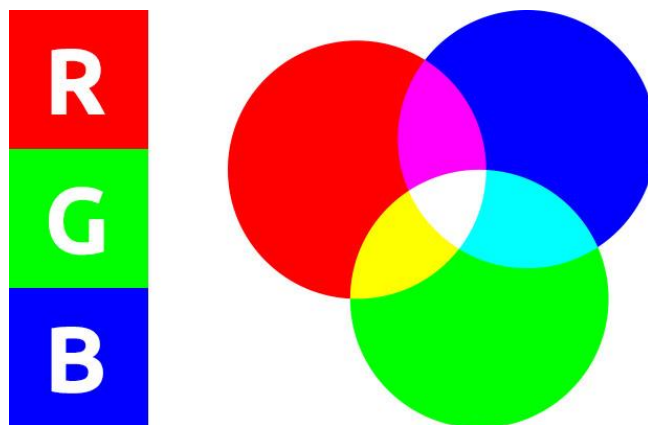
OpenCV (Open Source Computer Vision Library) je knihovna počítačového vidění a je vydána pod licencí BSD (Berkeley Software Distribution) a proto je zdarma pro akademické a komerční využití. Proto bylo rozhodnuto v této práci používat právě tuto knihovnu. Knihovna je napsaná v jazyce C/C++. OpenCV je knihovna pro realizaci počítačového vidění a má rozhraní pro C, C++, Python, MATLAB a Java a podporuje Windows, Linux, MacOS, iOS a Android. Knihovna OpenCV byla vytvořena pro výpočetní efektivitu a se zaměřením na práci v reálném čase. Knihovna podporuje multi-core processing. V této práci používá se knihovna OpenCV v. 3.3.1, která umožňuje zpracování obrazu na mikropočítači Raspberry Pi 3 B. [24]

6.1 Barevné prostory

Barevný prostor je matematický popis množiny barev, který je možné reprezentovat pomocí číselných hodnot. Barva každého pixelu v určitém barevném prostoru je popsána souřadnicovým systémem.

6.1.1 Barevný prostor RGB

Barevný prostor RGB (Red, Green, Blue) vytváří všechny barvy z kombinace červené, zelené a modré barvy. Každá hodnota určuje odstín jedné ze základních barev a nabývá číselné hodnoty od 0 do 255. Souřadnice všech barev v prostoru RGB je představená v rozmezích od (0,0,0) do (255,255,255). V knihovně OpenCV prostor RGB se používá jako BGR, což znamená, že hodnoty se musí zadávat v opačném pořadí.



Obr. 15: Grafické zobrazení RGB [25]

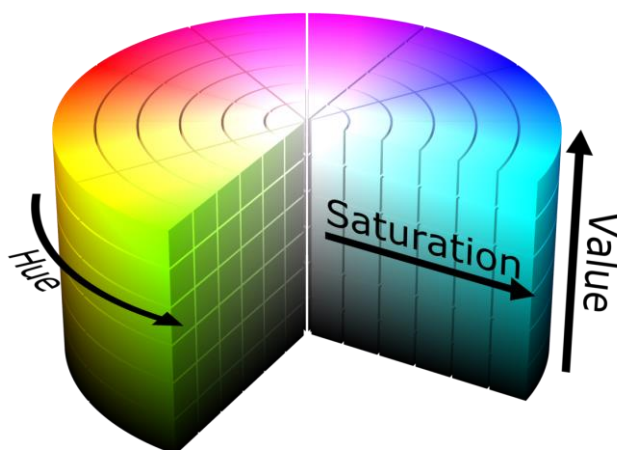
6.1.2 Barevný prostor HSV

V barevném prostoru HSV se každá barva skládá ze třech složek – Hue, Saturation, Value.

Hue – převládající barevný ton. Měří se jako poloha na barevném kole (0° až 360°). V knihovně OpenCV nabývá hodnot od 0 do 179.

Saturation – sytost barvy anebo příměs jiné barvy. Měří se v procentech od 0 % (šedá) do 100 % (plně sytá barva). Na barevném kole sytost vzrůstá od středu k okrajům. V knihovně OpenCV nabývá hodnot od 0 do 255.

Value – hodnota jasu. Měří se od 0 (černá barva) do 100 (jasná barva). V knihovně OpenCV nabývá hodnot od 0 do 255.



Obr. 16: Grafické zobrazení HSV [26]

7. POSTUP ŘEŠENÍ

7.1 Umístění kamery

Při použití kamery jsou možná 2 základní umístění kamery – nad hrací plochou a pod hrací plochou.

Kamera je umístěná pod hrací plochou

Kvůli tomu, že hrací plocha je udělána z průhledného materiálu, kamera může být umístěna pod hrací plochou.

Výhody:

- 1) Míček je viditelný vždy na celé centrální hrací ploše a nedojde k zákrytu míčku hráči.
- 2) Není přístup ke kameře a možnost do ní zasahovat.

Nevýhody:

- 1) Míček nebude viditelný, když se dostane do okrajových oblastí hrací plochy, kde není sklo.
- 2) Je omezená maximální vzdálenost kamery výškou stolu.
- 3) Existující osvětlení se musí dat pod hrací plochu.

Kamera je umístěná nad hrací plochou

Výhody:

- 1) Teoreticky není omezená výška, na jakou můžu umístit kameru.
- 2) Míček je viditelný na okrajových oblastech hrací plochy.
- 3) Nemusí se měnit poloha existujícího osvětlení.

Nevýhody:

- 1) Míček není vždy vidět, protože může dojít k zákrytu míčku hráči.



Obr. 17: Zákryt míčku hráčem [27]

7.2 Jedna V2 kamera

Jako první řešení byla použita jenom jedna V2 kamera, která byla umístěna nad hrací plochou. Nejvíce omezujícím kritériem je maximální vzdálenost kamery od hrací plochy. Výška od podlahy k ploše je 73 cm. Výška od plochy ke konstrukci, kam se dá umístit kameru je 90 cm. Plocha, na které se pohybuje míček má rozměry 120x70 cm. Po odečtení rozměrů neprůhledných částí plochy a plochy za brankáři od celé plochy dostaneme rozměr plochy 105x60 cm. Dodávaný objektiv s kamerou V2 má ohniskovou vzdálenost 3,04 mm a kamera má s tímto objektivem úhel záběru 62,2°x48,8°. Dodávaný objektiv s kamerou V1 má ohniskovou vzdálenost 3,6 mm a kamera má s tímto objektivem úhel záběru 53,50°x41,41°.

Pomocí goniometrických funkcí je možné vypočítat potřebnou minimální vzdálenost kamery od hrací plochy. [28]

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{a}{\frac{2}{h}} \Rightarrow h = \frac{a}{2 * \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (1)$$

$$h_{\min-x} \geq \frac{105}{2 * \operatorname{tg}\left(\frac{62,2}{2}\right)} \Rightarrow h_{\min-x} \geq 87 \text{ cm} \quad (1.1)$$

$$h_{min_y} \geq \frac{60}{2 * tg\left(\frac{48,8}{2}\right)} \Rightarrow h_{min_y} \geq 66,1 \text{ cm} \quad (1.2)$$

Kde:

α – úhel záběru kamery

a – rozměr hrací plochy

h – vzdálenost objektivu do hrací plochy

Kamery	f [mm]	fov_x [°]	fov_y [°]	h _{min_x} [cm]	h _{min_y} [cm]	h _{min} [cm]
Camera Module V2	3,04	62,2	48,8	87,0	66,1	87,0
Camera Module V1	3,60	53,50	41,41	104,2	79,37	104,2

Tab. 3 Výsledky výpočtu pro různé objektivy

Kde:

f – ohnisková vzdálenost

fov_x – horizontální úhel pozorování

fov_y – vertikální úhel pozorování

h_{min_x} – minimální vzdálenost objektivu pro horizontální směr

h_{min_y} – minimální vzdálenost objektivu pro vertikální směr

h_{min} – maximální vzdálenost h_{min_x} a h_{min_y}

Z tabulky 3 je vidět, že nelze umístit pod hrací stůl ani kameru V1, ani kameru V2. Nad hrací plochu nelze umístit kameru V1, proto bylo rozhodnuto použít kameru V2.

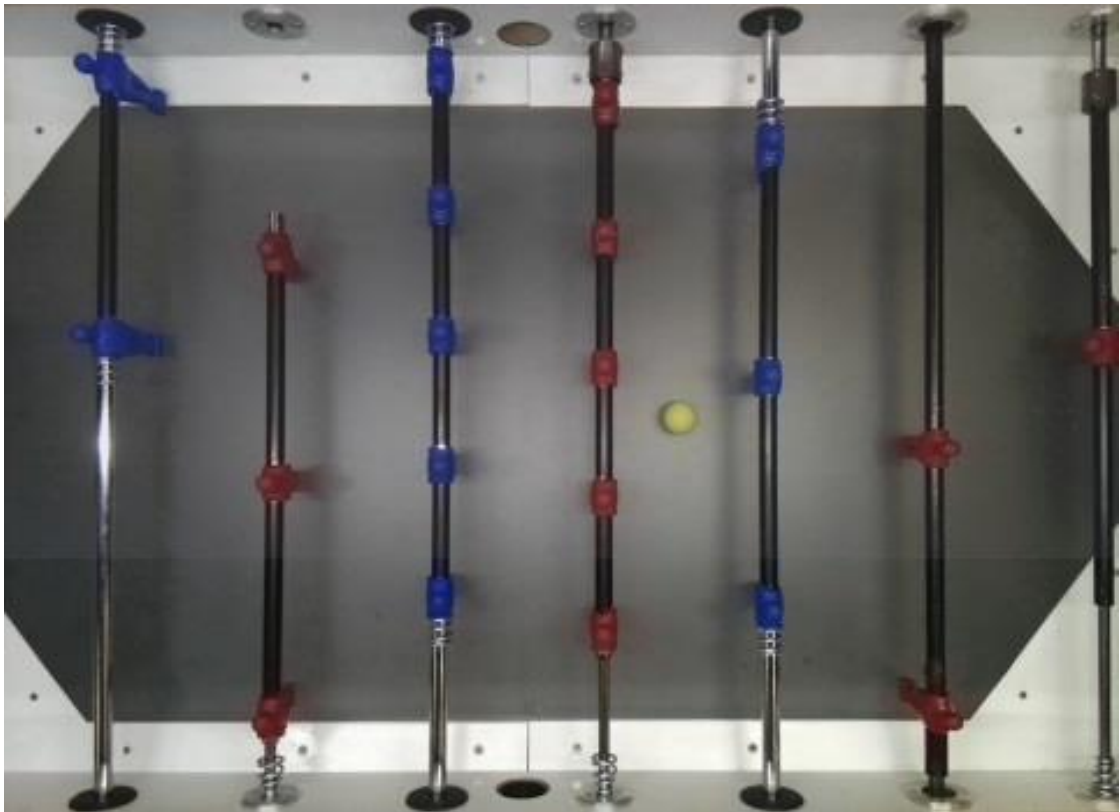
Jako první krok bylo vytvořeno připojení z počítače do Raspberry Pi pomocí SSH (Secure Shell), rozchození Raspberry Pi a provedení konfigurace systému. Pak byla do Raspberry Pi nainstalována knihovna OpenCV verze 3.3.1 a kompilátor gcc pro kompilování C/C++ programů.



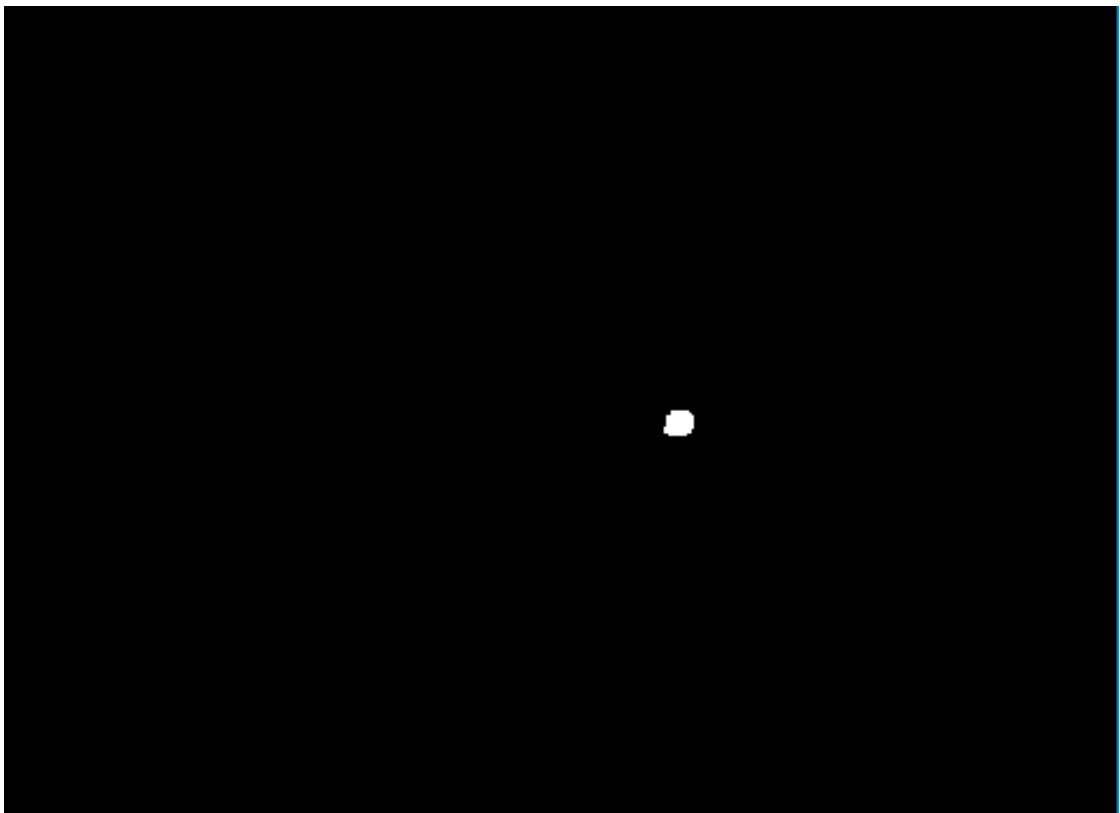
Obr. 18: Zapojení kamerového modulu V2 do Raspberry Pi 3 B

Bylo rozhodnuto dělat rozpoznávání obrazu podle barvy. Hráči fotbalu mají červenou a modrou barvy, proto byl vybrán žlutý míček. Při zpracování obrazu v programu se používá převod z prostoru RGB na prostor HSV, protože při detekci míčku v prostoru RGB jsou výsledky hledání velice závislé na osvětlení a je obtížné vymezit odstíny jedné barvy. Cílem bylo dosáhnout co nejvíce FPS (z anglického frames per second) kvůli velké rychlosti pohybu míčku na hrací ploše. Dlouhý provoz robotického stolního fotbalu, a hlavně Raspberry Pi, může způsobit zahřívání procesoru Raspberry Pi. Při zahřátí procesoru Raspberry Pi na teplotu 85 °C začíná klesat frekvence procesoru a zmenšuje se jeho životnost. Proto bylo rozhodnuto použít chladič a chladicí ventilátor pro ochlazení procesoru Raspberry Pi.

Po upevnění Raspberry Pi a kamery na konstrukci fotbalu byla v programu nastavena kamera na snímání rozlišení 640x480 pixelů. Pohled z kamery na hrací plochu je vidět na obrázku 19. Po zpracování obrazu na obrázku 20 je vidět výsledek hledání žlutého míčku na hrací ploše v prostoru HSV.

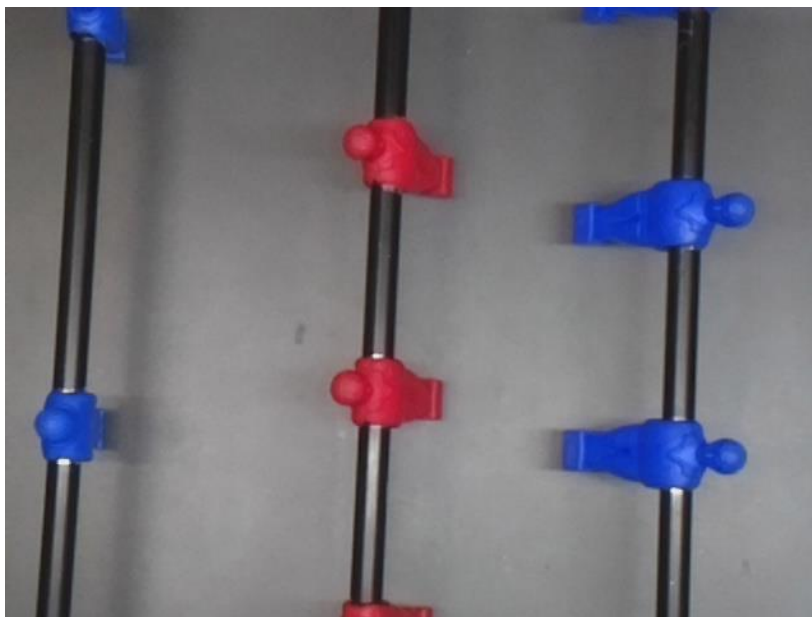


Obr. 19: Pohled na hrací plochu z kamery V2



Obr. 20: Výsledek hledání žlutého míčku kamerou V2 v barevném prostoru HSV

Podařilo se dosáhnout maximálně 40 FPS. Při nastavení více než 40 FPS v programu kamera V2 ořezává obraz (i při zmenšení snímacího rozlišení kamery) a je vidět jenom malý kousek plochy (obrázek 21). Bylo zjištěno, že kamera V2 v režimu full-view funguje jen do 40 FPS. Nad 40 FPS kamera funguje v režimu ořezávání obrazu (partial-view). Kvůli tomu, že míček se rychle pohybuje na hrací ploše, 40 FPS nestačilo na sledování jeho polohy, tak se muselo najít jiné řešení.



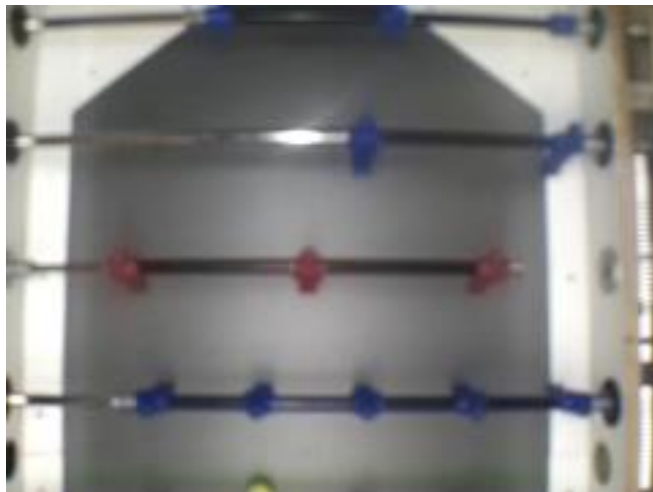
Obr. 21: Ořezávání obrazu kamerou V2 v režimu nad 40 FPS

Bylo by možné umístit dvě V2 kamery s dvěma Raspberry Pi nad středem hrací plochy. Taktovat a posílat postupně data o poloze míčku z jednoho a druhého Raspberry Pi do PC pomocí protokolu TCP, protože TCP je deterministický protokol. Ale kvůli tomu, že data o poloze míčku musí se dostat do PC co nejrychleji, aby stíhali reagovat motory, takže řešení nevyhovuje.

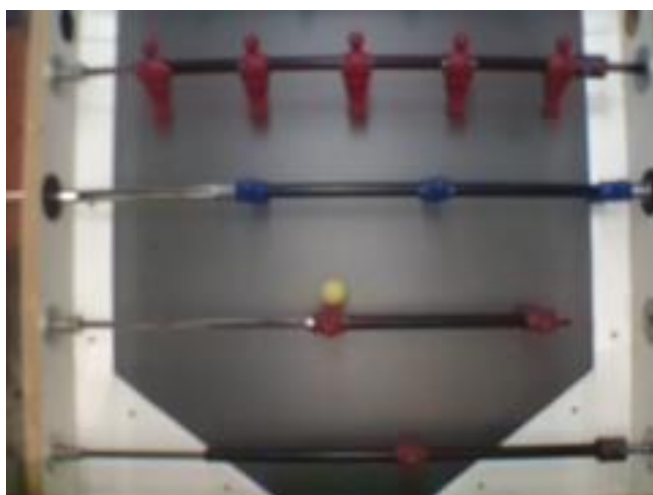
7.3 Dvě V2 kamery s fish-eye objektivy

Jako další řešení byly použity dvě Raspberry Pi a dvě V2 kamery, kde každou kamerou se snímá polovina hrací plochy. Takovým způsobem je možné zvýšit FPS z kamery. Kvůli tomu, že při zvýšení nad 40 FPS kamera funguje v režimu partial-view, bylo nutno použít fish-eye objektiv. Používal se objektiv Forever SL-300. Ten objektiv má úhlopříčku 0,4x. Při použití objektivu nestačí zvětšení obrazu na celou hrací plochu, ale jenom na polovinu. Po upevnění obou kamer a obou Raspberry Pi na konstrukci

fotbalu bylo nastaveno v programech kamery na snímací rozlišení 240x180 pixelů, čím bylo dosaženo až 87 FPS z každé kamery. Pohled z obou kamer na hrací plochu je vidět na obrázcích 21 a 22.

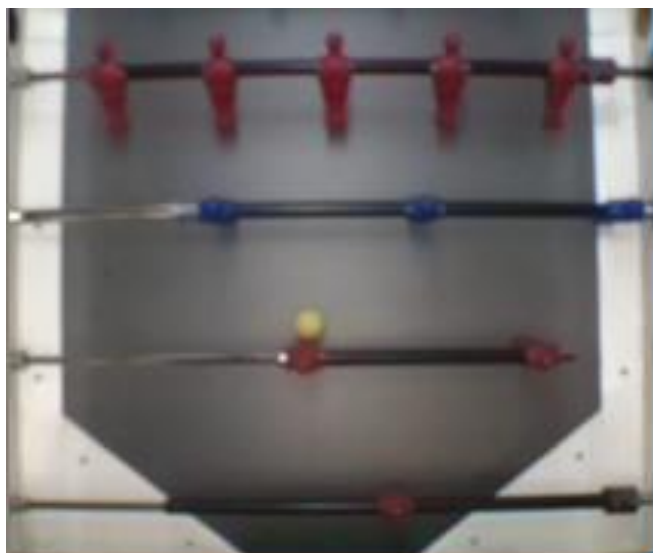


Obr. 22: Pohled na hrací plochu z první kamery V2 s objektivem



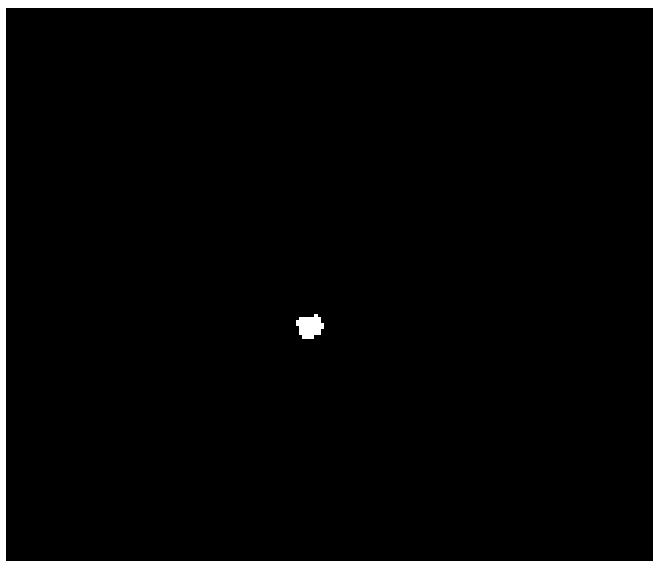
Obr. 23: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V2 s objektivem

Při použití objektivu kamera zachycuje na šířku víc, než je potřeba. Aby se zabránilo vyhledávání podobné barvy jako je míček byla v programu použita funkce knihovny OpenCV na ořezávání obrazu. Jak vypadá obrázek po ořezávání na příkladu fotky z druhé kamery V2 je na obrázku 23.



Obr. 24: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V2 s objektivem po ořezávání

Po zpracování obrazu z druhé kamery na obrázku 24 je vidět výsledek hledání žlutého míčku na hrací ploše v prostoru HSV.



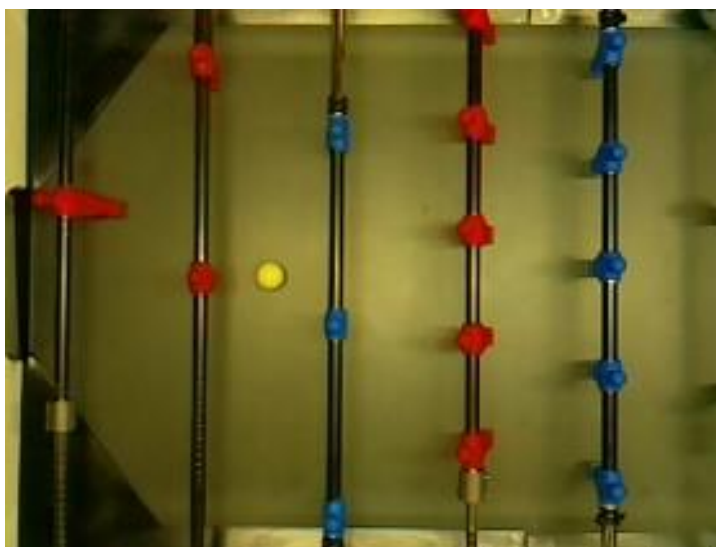
Obr. 25: Výsledek hledání žlutého míčku v barevném prostoru HSV

Chci poznamenat, že v porovnání s prvním řešením robotický stolní fotbal hrál o dost lépe.

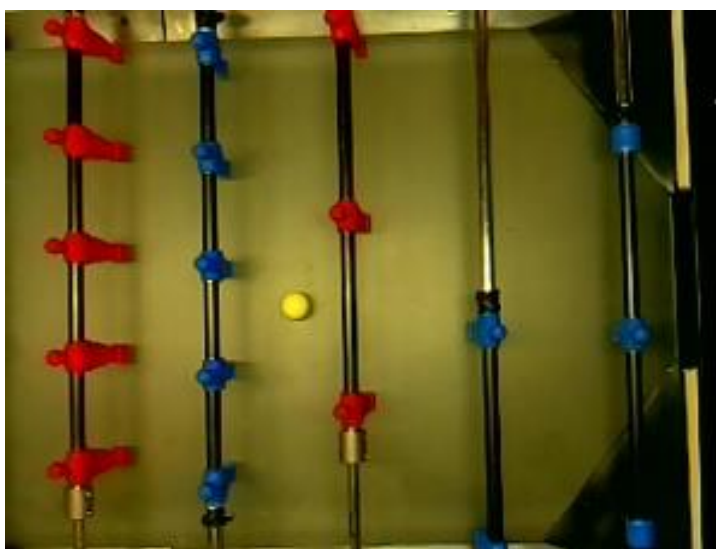
7.4 Dvě V1 kamery

Bylo zjištěno, že kamera V1 při navýšení nad 40 FPS neořezává obraz a funguje v režimu full-view. Proto byl použit stejný princip jako v předchozím řešení, ale kvůli

tomu, že kamera V1 neořezává obraz není potřeba používat žádný objektiv. Při použití objektivu se obraz rozmazává, což není dobré pro vyhledávání. Místo dvou V2 kamer byly zapojeny dvě V1 kamery bez objektivu. Na rozdíl od předchozího řešení bylo v programu zvýšeno rozlišení kamer, protože rozlišení 240x180 pixelů nebylo postačujícím pro vhodné vyhledávání. V programech byly nastaveny kamery na snímací rozlišení 360x270 pixelů, čím bylo dosaženo na začátku 78 FPS z každé kamery, a po optimalizaci programu se FPS zvýšilo na 87. Pohled z obou kamer na hrací plochu fotbalu je vidět na obrázcích 25 a 26.



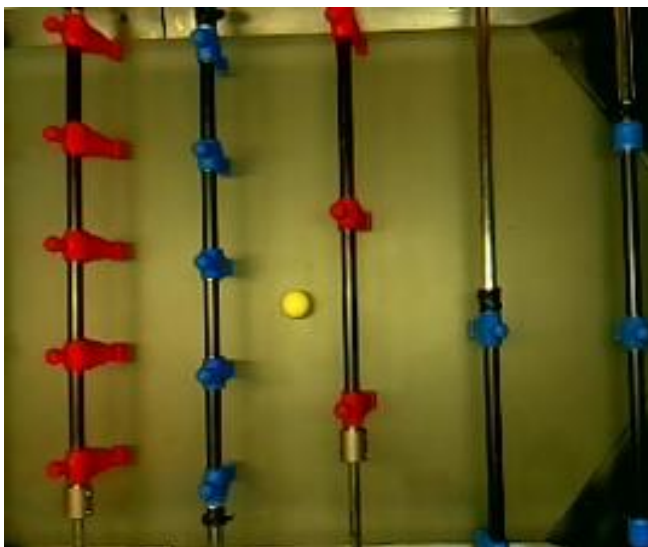
Obr. 26: Pohled na hrací plochu z první kamery V1



Obr. 27: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V1

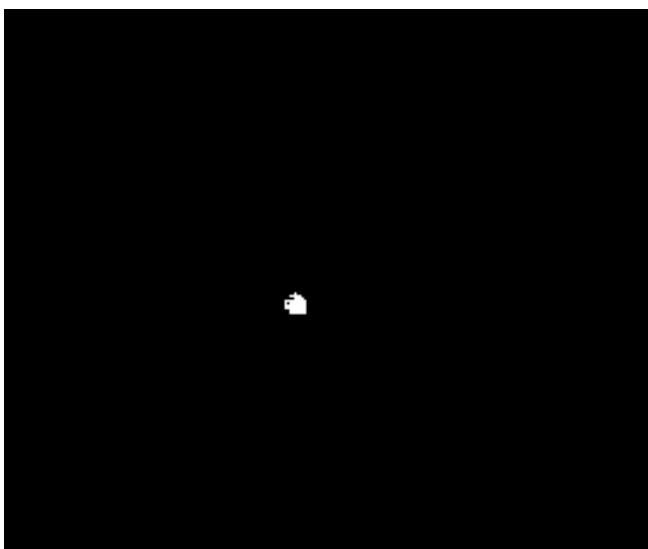
Pro druhou kameru byla použita v programu funkce na ořezávání obrazu. Pro

první kameru se nepoužívá funkce na ořezávání obrazu, protože strategie robotického stolního fotbalu potřebovala vidět míček za robotickým brankářem. Jak vypadá obrázek po ořezávání je vidět na obrázku 27.

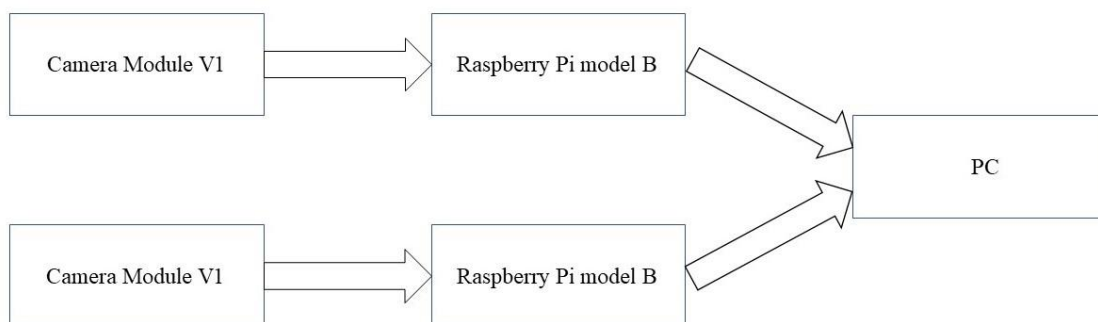


Obr. 28: Pohled na hrací plochu z druhé kamery V1 po ořezávání

Po zpracování obrazu z druhé kamery je na obrázku 28 vidět výsledek hledání žlutého míčku na hrací ploše v prostoru HSV.



Obr. 29: Výsledek hledání žlutého míčku kamerou V1 v barevném prostoru HSV



Obr. 30: Schéma zapojení pro přenos dat

V porovnání s prvním a druhým řešením je toto řešení nejlepší a při tomto řešení robotický fotbal hraje nejlépe.

Pro umístění obou Raspberry Pi kamer nad hrací plochou fotbalu musel být navržen držák na kameru. Bc. Ondřej Švanda vymodeloval model držáku v programu Autodesk Fusion 360, který byl pak vytisknutý na 3D tiskárně.

8. POPIS ALGORITMU PRO VYHODNOCENÍ POLOHY MÍČKU

Snahou bylo najít co nejjednodušší algoritmus pro vyhodnocení polohy míčku, aby cyklus rozpoznávání probíhal co nejrychleji a co nejmíň by zatěžoval procesor Raspberry Pi, aby bylo ve výsledku dosaženo co nejvíce FPS. Program byl napsán v programovacím jazyce C++ s použitím knihovny OpenCV v. 3.3.1. Byla nastavena automatická aktivace programu po zapnutí Raspberry Pi. Na přiloženém CD lze najít celý kompletní program pro Raspberry Pi.

1. Zapnutí kamery pro natáčení.

```
VideoCapture cap(0);
```

2. Funkce pro nastavení parametrů kamery (rozlišení kamery a FPS).

```
cap.set(CV_CAP_PROP_FRAME_WIDTH, 360);  
cap.set(CV_CAP_PROP_FRAME_HEIGHT, 270);  
cap.set(CV_CAP_PROP_FPS, FPS);
```

3. `getStructuringElement()` – morfologická funkce, která vrací strukturní prvek určené velikosti a tvaru.

```
Kern = getStructuringElement(MORPH_RECT, Size(1, 1), Point(-1, -1));
```

4. Definování dolní a horní hranice třírozměrného intervalu, který určuje hodnoty H, S, V parametrů. Maximální interval parametru H je <0, 179>. Maximální interval parametrů S a V je <0, 255>. Kvůli malému rozlišení kamery (360x270 pixelů) se musely hodně omezit intervaly parametrů S a V pro správné vyhledávání míčku. Experimentálně bylo stanoveno, že pro vyhledávání žlutého míčku na hrací ploše s osvětlením, které je na robotickém stolním fotbalu, musí odpovídat následující intervaly barevného prostoru HSV:

H (barevný ton): 27 až 34 bodů.

S (syntost barvy): 175 až 255 bodů.

V (hodnota jasu): 185 až 255 bodů.

```
Scalar hsv_l(27, 175, 185);  
Scalar hsv_h(34, 255, 255);
```


5. Funkce pro ořezávání obrazu z kamery. V programu pro druhou kameru se funkce na ořezávání obrazu nepoužívá.

```
Rect myROI (0, 0, 320, 270);
```

6. Začátek nekonečného cyklu, ve kterém bude probíhat zpracování obrazu z kamery a následně odeslání dat o poloze míčku do PC.

```
while(1)
{
```

7. Zachycení aktuálního snímku z kamery.

```
cap >> frame_actual;
```

8. Ořezávání aktuálního snímku, který následně se uloží do jiné proměnné.

```
Mat croppedImage = frame_actual(myROI);
```

9. Převod vstupního obrazu z barevného prostoru RGB do barevného prostoru HSV

```
cvtColor(croppedImage, HSV, CV_BGR2HSV);
```

10. Binarizace obrazu s určitými prahovými hodnotami.

```
inRange(HSV, hsv_l, hsv_h, bw);
```

11. Dilate – morfologická funkce pro sloučení světlé oblasti na snímku.

```
dilate(bw, dilate_im, Kern, Point(-1, -1), 3);
```

12. Algoritmus pro výpočet souřadnic těžiště míčku. Do proměnných X a Y se zapisují hodnoty středu polohy míčku v pixelech. Pokud kamera nezachycuje míček, posílají se záporné hodnoty o poloze míčku (-1,-1).

```
Xc = 0;
Yc = 0;
counter = 0;
X = 0;
Y = 0;
uchar* ptr;
for (int y = 0; y < dilate_im.rows; y++)
{
    ptr = (uchar*)(dilate_im.data + y * dilate_im.step);

    for (int x = 0; x < dilate_im.cols; x++)
    {
        Xc += ptr[x] * x;
        Yc += ptr[x] * y;
        counter += ptr[x];
    }
}
```

```
    }  
}  
  
if (counter > 0)  
{  
    X = Xc / counter;  
    Y = Yc / counter;  
}  
else  
{  
    X=-1;  
    Y=-1;  
}
```

Přepoččet z pixelů na unity (jednotky, se kterými pracuje strategie; jedna desetina milimetru) se vykonává v PC, aby se nezatěžoval procesor Raspberry Pi. Přepočtem se zabýval kolega, který pracoval na strategii robotického stolního fotbalu.

9. POPIS KOMUNIKAČNÍHO ALGORITMU

První požadavek firmy k realizaci prací bylo vytvořit komunikaci mezi Raspberry Pi a PC pomocí protokolu Powerlink. V prvním kroku se zkoušelo ověřit komunikaci po Powerlinku mezi dvěma Raspberry Pi 3 B. Jedno Raspberry Pi bylo nastaveno jako Managing Node, druhé Raspberry Pi jako Controlled Node. Výsledek byl úspěšný a obě Raspberry Pi mezi sebou navzájem komunikovaly po Powerlinku. Při ověřování komunikace mezi Raspberry Pi a PC, kde PC byl nastaven jako Managing Node, s cyklem Powerlinku 2 ms, a Raspberry Pi jako Controlled Node docházelo k chybě a zařízení nekomunikovaly. Pak bylo zjištěno, že pro funkční komunikaci je potřeba mít v PC cyklus Powerlinku nastavený na 50 ms, protože minimální doba cyklu Powerlinku v Raspberry Pi 3 B je 50 ms. Jelikož s cyklem Powerlinku v 50 ms je možné posílat data o poloze míčku jenom 20krát za jednu sekundu, musel se pro komunikaci použít jiný protokol. [29][30]

Protože data o poloze míčku musí se dostat do PC co nejrychleji, aby stíhaly reagovat motory, byl zvolen protokol UDP pro komunikaci mezi Raspberry Pi a PC. Při použití protokolu UDP na rozdíl od protokolu TCP není potvrzováno doručení dat z jednoho zařízení do druhého, což podstatně zrychluje komunikaci. Při použití protokolu UDP data se mohou sice ztratit, poškodit nebo duplikovat, což v tomto případě nevádí, protože hlavní prioritou je rychlost přenosu dat mezi zařízeními.

Obě Raspberry Pi fungují jako klienti, kteří posílají data o poloze míčku a žádná data nepřijímají. PC pak funguje jako server, který přijímá data od obou Raspberry Pi a žádná data jim neposílá.

IP adresa v PC je nastavena na: 172.25.15.68

IP adresa v jednom Raspberry Pi je nastavena na: 172.25.15.80

IP adresa v druhém Raspberry Pi je nastavena na: 172.25.15.81

Dále je popsána implementace klientů v Raspberry Pi, která je realizovaná v programu spolu se zpracováním obrazu.

1. Definování délky stringu, do kterého se zapisuje informace o poloze míčku, číslo portu a IP-adresa serveru (PC). Pro komunikaci mezi druhým Raspberry Pi a PC port je nastaven na číslo 6557.

```
#define BUFLen 16
```

```
#define PORT 6558  
#define SRV_IP "172.25.15.68"
```

2. Vytvoření datového socketu.

```
ss=socket(AF_INET, SOCK_DGRAM, IPPROTO_UDP);
```

3. Funkce memset slouží pro vyplnění bloku paměti.

```
memset((char *) &si_other, 0, sizeof(si_other));
```

4. Zaplnění parametru struktury sockaddr_in. Jako první parametr se vyplní rodina protokolu (v našem případě IPv4), jako druhý parametr – číslo portu, ke kterému se připojí.

```
si_other.sin_family = AF_INET;  
si_other.sin_port = htons(PORT);
```

5. Začátek nekonečného cyklu (je to stejný cyklus ve kterém probíhá zpracování obrazu).

```
while(1)  
{
```

6. Odeslání dat o poloze míčku do PC po zpracování obrazu a zavření nekonečného cyklu.

```
sprintf(buf, "%d;%d", X, Y);  
sendto(ss, buf, BUFLen, 0, (struct sockaddr*)&si_other, slen);  
}
```

7. Zavření socketu a ukončení programu.

```
close(ss);  
return 0;  
}
```

UDP server, který je implementován v PC pomocí Automation Studia, a napsán v jazyce Structured text, je klasickým příkladem implementace UDP serveru firmou B&R v Automation Studio, jenom se změnou některých parametrů.

10. ZÁVĚR

V rámci zadané bakalářské práce byl navržen algoritmus pro vyhodnocení polohy míčku kamerou Raspberry Pi na robotickém stolním fotbalu a algoritmus komunikačního protokolu Raspberry Pi – PC.

V úvodu práce byly uvedeny existující zajímavá řešení robotického stolního fotbalu a popsány používané komponenty technického vybavení. Dále byly popsány výhody a nevýhody umístění kamery, ze kterých se pak vycházelo v této práci. Dále byly popsány tři možnosti řešení s kamerami Raspberry Pi pro vyhodnocení polohy míčku. Při použití jedné kamery V2 Raspberry Pi, po zvýšení rychlosti snímání nad 40 FPS bylo zjištěno, že kamera funguje v režimu ořezávání obrazu (partial-view). Jelikož 40 FPS nebylo postačujícím výsledkem, tak bylo hledáno jiné řešení. Jako vhodnější řešení bylo použito dvě Raspberry Pi a dvě V2 Raspberry Pi kamery s fish-eye objektivy, kde každou kamerou se snímá polovina hrací plochy. Jako nejlepší řešení, bylo vymyšleno použití dvou V1 kamer Raspberry Pi, které vždy pracují v režimu full-view, kde každá kamera snímá polovinu hrací plochy a po vyhodnocení polohy míčku Raspberry Pi se posílají data o poloze do PC. Bylo dosaženo 87 FPS z každé kamery při rozlišení 360x270 pixelů.

V práci byl popsán algoritmus pro vyhodnocení polohy míčku kamerou Raspberry Pi. Snahou bylo najít co nejjednodušší algoritmus, aby ve výsledku bylo dosaženo nejvíc FPS z kamery. Program byl napsán v programovacím jazyce C++ s použitím knihovny OpenCV v. 3.3.1.

Při návrhu komunikačního algoritmu mezi Raspberry Pi 3 B a PC byl vybrán protokol UDP a navržena implementace protokolu, kde jako klienti pro odeslání dat se používají dvě Raspberry Pi 3 B, a jako server pro přijímání dat se používá PC. Byla vytvořena komunikace pomocí protokolu Powerlink mezi dvěma Raspberry Pi 3 B. Při vytvoření komunikace pomocí Powerlinku mezi Raspberry Pi a PC bylo zjištěno, že Powerlink není vhodné používat, protože minimální cyklus Powerlinku v Raspberry Pi je 50 ms. Jelikož s cyklem Powerlinku o délce 50 ms je možné posílat data o poloze míčku jenom 20krát za jednu sekundu, protokol Powerlink nemůže být vhodným řešením.

Na přiloženém CD je celý kompletní program pro Raspberry Pi, projekt

vytvořený v Automation Studiu pro UDP server na PC a video testovací hry.

Dosažené výsledky na reálném modelu robotického stolního fotbalu

Ve školním roce 2017/2018 byl celý projekt robotického stolního fotbalu rozdělen mezi pět studentů bakalářského studia. Programováním strategie robotického fotbalu se zabýval Bc. Pavel Vaverka, řízením herních os se zabýval Bc. Ondřej Sláma, systémovou integraci se zabýval Bc. Ondřej Švanda a optimalizací snímání hrací plochy se zabývala Bc. Simona Sijková.

Bc. Simona Sijková se ve své bakalářské práci zabývala optimalizací snímání hrací plochy fotbalu pomocí smart-kamery Cognex IS 7402, která posílá data do PC pomocí protokolu Powerlink. Ve výsledku její práce se jí podařilo dosáhnout 55 FPS z kamery. Je to o 32 FPS méně než u řešení s kamerami Raspberry Pi. Po vyzkoušení obou řešení (smart-kamera Cognex IS 7402 a dvě Raspberry Pi kamery) bylo zjištěno, že robotický stolní fotbal hraje lépe se dvěma kamerami Raspberry Pi. Řešení se dvěma V1 Raspberry Pi kamerami na rozpoznávání polohy míčku je lepší a levnější, proto bylo firmou B&R rozhodnuto, že bude použito v koneční verzi projektu.

Po dokončení bakalářských prací firmou B&R byl robotický stolní fotbal úspěšně prezentován na několika akcích v České republice (Mezinárodní strojírenský veletrh v Brně, Hudba z FEKTu, Den otevřených dveří na FSI VUT), kde si návštěvníci mohli vyzkoušet zahrát stolní fotbal proti „našemu“ robotickému návrhu. Jak se ukázalo, o hru byl velký zájem a přibližně v 50 % porazil robot člověka.

Po úspěšné prezentaci na Hudbě z FEKTu v roce 2018, o robotickém stolním fotbalu firmy B&R byl napsán článek v E-Fektu pod názvem „Poraž robota & vyhraj pivo!“. V článku se popisuje, jak funguje robotický stolní fotbal, s jakými problémy se potkalo a popsán další výhled do budoucna. [31]

Literatura

- [1] Fun Football Table. Liberty Games [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.libertygames.co.uk/store/football_tables/family_football_tables/fun-football-foosball-table/
- [2] Table Football (Foosball) - History & Useful Information. Tradgames [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.tradgames.org.uk/games/table-football.htm>
- [3] MYSLIVEC, VOJTĚCH. Robotic Table Soccer. VOJTĚCH MYSLIVEC [online]. 2015 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://vojtech.myslivec.net/robotic-table-soccer>
- [4] Robots Now Beating Humans at Foosball. Robotics Business Review [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.roboticsbusinessreview.com/rbr/robots_now_beating_humans_at_foosball/
- [5] Student projects: from robots playing Foosball to flexible robots. EPFL [online]. 2013 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://sti.epfl.ch/page-97901-en.html>
- [6] ØRDING-THOMSEN, Martin a Anders CHR. MYRUP. Software til automatiseret bordfodbold [online]. 2007 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://foospmp.myl.dk/media/rapport.pdf>. Danmarks Tekniske Universitet.
- [7] DC Motors Give Foosball Robots The Winning Edge. MICROMO [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.micromo.com/applications/robotics-factory-automation/tabletop-soccer>
- [8] Servo drive technology that amazes. PILZ [online]. 2016 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-INT/company/news/articles/088030>
- [9] G-500 EVOLUTION. Garlando [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.garlando.com/products/the-classics/home-football-tables/g-500-evolution/>
- [10] VÝKONNÁ PRUHOVÁ SVĚTLA LL-W. ATEsystem [online]. [cit. 2019-03-25].

- Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/produkty/podle-vyrobce/smart-view/vykonna-pruhova-svetla/>
- [11] Výkonná pruhová světla. Smart View [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.smartview.cz/osvetleni/vykonna-pruhova-svetla>
 - [12] Panel PC 2100 multi-touch. B&R Automation [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/industrial-pcs/panel-pc-2100-multi-touch/>
 - [13] Automation Studio - B&R Help Explorer 4.4.4.64. B&R Automation [cit. 2019-03-25]
 - [14] Software. B&R Automation [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/products/software/>
 - [15] Raspberry Pi 3 Model B. Raspberry Pi [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
 - [16] FAQs - Raspberry Pi Documentation. Raspberry Pi [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/>
 - [17] Camera Module - Raspberry Pi Documentation. Raspberry Pi [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/README.md>
 - [18] Camera Module V2. Raspberry Pi [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/>
 - [19] POWERLINK Mechanism. OpenPOWERLINK [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://openpowerlink.sourceforge.net/web/POWERLINK/Mechanism.html>
 - [20] POSTEL, Jon. Transmission Control Protocol [online]. USA, 1981 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc793>. University of Southern California.
 - [21] Protokol UDP 1.část. Builder [online]. 2003 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.builder.cz/rubriky/c/c--/protokol-udp-1-cast-156226cz>
 - [22] Protokol UDP 2.část. Builder [online]. 2003 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <http://www.builder.cz/rubriky/c/c--/protokol-udp-2-cast-156227cz>

- [23] POSTEL, Jon, ed. User Datagram Protocol [online]. USA, 1980 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc768>. University of Southern California.
- [24] OpenCV library. OpenCV [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://opencv.org/>
- [25] CMYK, RGB OR PANTONE?. Fotolia [online]. 2015 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://blog.fotolia.com/us/2015/03/26/cmyk-rgb-or-pantone/>
- [26] HSV. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/HSV>
- [27] Table ball control. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Stoln%C3%AD_fotbal#/media/File:Bonzini_style_table_ball_control.jpg
- [28] Angle of view. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_view
- [29] Quick Start – POWERLINK on Raspberry Pi2. Kalycito [online]. 2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.kalycito.com/guides/quick-start-powerlink-on-raspberry-pi2/>
- [30] Cycle-time-measurement-POWERLINK-on-raspberry-pi-2. Kalycito [online]. 2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.kalycito.com/guides/cycle-time-measurement-powerlink-on-raspberry-pi-2/>
- [31] E-Fekt. Aktuální číslo E-Fektu [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://sps-fekt.cz/e-fekt/>
- [32] BUBENÍK, Ľubomír. MODEL ROBOTICKÉHO STOLNÍHO FOTBALU [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15059
6. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

- [33] SIJKOVÁ, Simona. Robotický stolní fotbal - optimalizace snímání hrací plochy [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17365
6. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

Seznam příloh

Příloha A.: CD-ROM obsahující elektronickou verzi této bakalářské práce, C++ program pro Raspberry Pi, projekt v Automation Studio pro UDP server, video testovací hry